



University Of Qom



Wavelet Transform with Reduced Edge Effects for Damage Identification in the Beams under Incremental Damage

Farhad Jedari Zarezadeh¹, Masood Farzam², Saman Bagheri³

1. Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: farhadjedari@tabrizu.ac.ir

2. Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: mfarzam@tabrizu.ac.ir

3. Corresponding author, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: s_bagheri@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 13 Nov 2023

Revised 12 Mar 2024

Accepted 02 Apr 2024

Published 03 Apr 2024

Keywords:

Damage Identification,
Localization of Damage,
Incremental Damage,
Wavelet Transform,
Edge Effects.

ABSTRACT

In this study, wavelet transform with reduced edge effects is used to detect, localize and estimate the incremental damage at various levels in steel beams with different support conditions. For this purpose, a steel beam is modeled using finite element method for two types of support conditions, and three levels of incremental damage is defined by changing the stiffness of the member at a specified location. Then, dynamic displacement response of the beam under impulse loading was extracted and processed with continuous wavelet transform. The continuous wavelet transform of a finite length signal produces abnormally large coefficients close to the borders of the signal which is called "edge effects". To handle edge effects, different methods of signal extension are investigated. The obtained results from the process of extrapolated response by the cubic spline method show that the false indicators caused by edge effects are reduced significantly. In this case, there is a meaningful correlation between relatively large wavelet coefficients and damage location. The wavelet coefficients obtained from several measurements at the detected location of damage is used then to estimate changes in the level of incremental damage. It is shown that the variation of wavelet coefficients at the location of damage is reasonably estimate the various damage levels. Finally, the effects of the presence of low levels of noise in the measured responses of the beam on the proposed damage detection process are evaluated.

Cite this article: Jedari Zarezadeh F, Farzam M, Bagheri S. Wavelet Transform with Reduced Edge Effects for Damage Identification in the Beams under Incremental Damage. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(2): 1-19. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10087.1521>



تبدیل موجک با کاهش اثرات لبه برای آسیب‌یابی در تیرهای تحت آسیب افزایشی

فرهاد جداری زارعزاده^۱، مسعود فرزام^۲، سامان باقری^۳✉

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: farhadjedari@tabrizu.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mafazam@tabrizu.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: s_bagheri@tabrizu.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر از تبدیل موجک با کاهش اثرات لبه برای تشخیص، تعیین موقعیت و تخمین تغییر شدت آسیب در حالت آسیب افزایش‌یابنده در طول تیرهای فولادی با شرایط تکیه‌گاهی مختلف استفاده شده است. برای این منظور تیر فولادی با شرایط مرزی دو سر مفصل و دو سر گیردار با روش اجزای محدود مدل‌سازی شده و آسیب‌های افزایشی، در یک نقطه از طول تیر در سه سطح مختلف با ایجاد تغییر در سختی عضو تعریف گردید. سپس با اعمال تحریک دینامیکی ضربه بر تیر، پاسخ دینامیکی عضو به صورت جابه‌جایی از نقاط مختلف در طول آن استخراج شده و با استفاده از تبدیل موجک پیوسته پردازش گردید. تولید ضرایب موجک بسیار بزرگ در نقاط تکیه‌گاهی، نتیجه ذاتی تبدیل موجک در نقاط مرزی است که اثرات لبه نامیده می‌شود. به منظور پیشگیری از تأثیر منفی اثرات لبه بر تفسیر نتایج، روش‌های مختلف برون‌یابی پاسخ به سمت خارج از بازه طول تیر مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب موجک بدست آمده از پردازش پاسخ برون‌یابی شده به روش اسپیلاین مکعبی نشان داد که تأثیر منفی اثرات لبه بر نتایج آسیب‌یابی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و در این صورت، ضرایب موجک حداکثر در طول تیر محل آسیب را با دقت خوبی نشان می‌دهد. در ادامه، از تغییرات مقادیر ضرایب موجک حاصل از سنجش‌های متعدد در محل آسیب به منظور تخمین تغییر شدت آن استفاده شد. در نهایت، اثر وجود نویز اندک در پاسخ‌های اخذ شده از تیر بر فرآیند آسیب‌یابی پیشنهادی ارزیابی گردید.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵

کلیدواژه‌ها:

آسیب‌یابی،
تعیین موقعیت آسیب،
آسیب افزایشی،
تبدیل موجک،
اثرات لبه.

استناد: جداری زارعزاده فرهاد، فرزام مسعود، باقری سامان. تبدیل موجک با کاهش اثرات لبه برای آسیب‌یابی در تیرهای تحت آسیب افزایشی.

پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ ۱۰(۲): ۱-۱۹. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10087.1521>

۱- مقدمه

تشخیص زود هنگام آن، واور^۲، با گردآوری نتایج پژوهش‌های مختلف به این نتیجه رسید که بررسی دقیق رفتار ارتعاشی شفت‌های دوار ترک‌خورده بر فرآیند آسیب‌یابی آنها اثرگذار است و همچنین می‌تواند مبنایی برای بررسی رفتار دینامیکی تیرها و ستون‌های ترک‌خورده نیز باشد [۲]. سالوو^۳، با بررسی تأثیر ترک‌های سازه‌ای بر فرکانس‌های طبیعی سیستم و گردآوری روش‌های مختلف آسیب‌یابی براساس ارزیابی‌های دوره‌ای از مشخصات ذاتی سازه به این نتیجه رسید که تا زمانی که تغییرات نسبی فرکانس طبیعی یک سازه به پنج درصد نرسد، امکان اعلام قطعی آسیب در آن سازه وجود ندارد. همچنین او اذعان داشت که تغییرات فرکانس طبیعی سازه برای تعیین موقعیت آسیب کافی نمی‌باشد، چون ممکن است یک آسیب مشابه در چند موقعیت متفاوت، تغییرات یکسانی را در فرکانس طبیعی سازه ایجاد کند [۳].

تأثیر وجود آسیب در یک سازه بر پارامترهای ذاتی آن، امری است که در حال حاضر نیز مورد توجه محققان قرار گرفته است. به منظور پایش سلامت تیرها در یک سازه، شا^۴ و همکاران، بررسی تغییرات نسبی فرکانس طبیعی را برای توصیف آسیب‌های موضعی در تیرها پیشنهاد کردند. در این روش، ارتباط بین منحنی‌های تغییرات نسبی فرکانس طبیعی و اشکال مودی به صورت یک رابطه صریح به دست آمده و در دو مرحله برای تعیین موقعیت و شدت آسیب در طول یک تیر ترک‌خورده مورد استفاده قرار گرفت [۴]. در پژوهشی دیگر، لی^۵ با بررسی پارامترهای ذاتی یک قاب پرتال در یک فرآیند ارزیابی دو مرحله‌ای، موقعیت و شدت آسیب را تخمین زد. او با مدل‌سازی اجزای محدود سازه و تعریف یک الگوریتم بهینه‌سازی، المان‌های آسیب‌دیده را از المان‌های سالم

وقوع خرابی در سازه‌ها تحت اثر عوامل مختلف، امری محتمل است که البته به هیچ وجه مطلوب نمی‌باشد. عواملی مانند تنزل کیفیت مصالح در اثر بارگذاری‌های نامتعارف سیستم، محرک‌های محیطی و یا حوادث ناگهانی پیش‌بینی نشده مانند زلزله، سیل و موارد دیگر می‌توانند فرآیند شکست یک سیستم سازه‌ای را تسریع کنند. سیستم پایش سلامت سازه‌ای سیستمی است که می‌تواند از شکست سازه‌های مهم و حیاتی عمرانی نظیر پل‌ها، سدها و تجهیزات نیروگاهی جلوگیری کند. در طول تاریخ علم مهندسی، روش‌های مختلفی برای ارزیابی وضعیت ایمنی سازه‌های موجود، برنامه‌ریزی و طراحی شده است که ابتدائی‌ترین آن‌ها بازرسی حضوری و چشمی از سازه‌ها بوده است. اما این روش، مشکلاتی را نیز به همراه دارد؛ کمبود تجربه شخص بازرسی سازه، تعبیر و تفسیر اشتباه موارد مشاهده‌شده، عدم تشخیص آسیب‌های فزاینده، پنهان ماندن برخی موارد از چشم بازرسی سازه، عدم دسترسی به برخی قسمت‌های سازه‌های بزرگ و تهدید خطرات جانی بازرسی سازه مواردی می‌باشند که محققان را مجاب به یافتن رویکردی جدید در بازرسی از سازه‌ها کرده است.

در سال‌های اخیر، با پیشرفت و ارتباط علوم مهندسی و آمار، روش‌های نوینی برای سنجش سلامت سازه‌ها پیشنهاد شده است. یکی از رویکردهای محبوب، اندازه‌گیری خواص و پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ها می‌باشد که بسته به روش اجرای آن، می‌تواند برای زمان‌های متناوب و طولانی، اطلاعات مفیدی از وضعیت سلامت سازه‌ها گزارش کند. استفنس^۱ با بررسی نسبت میرایی ذاتی در سازه آسیب‌دیده و سالم دریافت که این پارامتر با حضور ترک در سازه قابل تغییر است [۱]. با توجه به اهمیت بالای ترک در سیستم‌های مکانیکی و ضرورت

²- Wauer

³- Salawu

⁴- Sha

⁵- Lee

¹- Steffens

استخراج شد. مودهای اول ارتعاش به دست آمده از سنجش‌های متعدد، با استفاده از تبدیل موجک سیملت پردازش گردیده و خروجی آن با استفاده از روش‌های آماری تجزیه و تحلیل شد. نتایج به دست آمده در روش مذکور توانست شدت آسیب را نشان دهد و محتمل‌ترین موقعیت آن را در طول تیر برآورد کند [۹].

فلسفه استفاده از تبدیل موجک در آسیب‌یابی سازه‌ها بر شناسایی ناپیوستگی‌ها در پاسخ سازه که تحت اثر ترک یا هر آسیب دیگر در آن بوجود آمده‌اند، بنا نهاده شده است [۱۰]. لازم به ذکر است که مقادیر بسیار کوچک ناپیوستگی‌ها ممکن است مستقیماً مشهود نباشند، بنابراین در پژوهش‌های آسیب‌یابی از تبدیل موجک به منظور تشدید و استخراج آنها استفاده می‌شود [۱۱]. به این ترتیب ممکن است عملکرد توابع موجک مادر گوناگون در مسائل مختلف با هم متفاوت باشد. به عنوان مثال، در پژوهشی که کوئک^۸ و همکاران انجام دادند، منحنی خیز یک تیر دوسر مفصل ترک‌خورده از مدل اجزای محدود آن استخراج و به عنوان سیگنال ورودی تبدیل موجک، با استفاده از توابع موجک هار و گابور پردازش شد. نتایج این بررسی نشان داد که تابع موجک مادر هار برای تعیین موقعیت ترک در طول تیر حساسیت بیشتری نسبت به تابع موجک مادر گابور دارد [۱۲].

در مطالعات آسیب‌یابی که به صورت مدل‌سازی عددی انجام یافته‌اند، نیاز به شبیه‌سازی آسیب می‌باشد. متداول‌ترین روش برای در نظر گرفتن ترک‌خوردگی و یا سایر انواع آسیب‌ها، کاهش سختی در محل آسیب است که این کار با کاهش مدول الاستیسیته عملی می‌شود [۱۳-۱۶]. در تحقیقی، آسیب متغیر با زمان در تیر فولادی با کاهش مدول الاستیسیته در مقادیر مختلف مدل‌سازی گردیده و با تعریف معیار خرابی متغیر با زمان

تمییز داد. براساس الگوریتم بهینه‌سازی مذکور، در ابتدا المان‌های آسیب‌دیده محتمل مشخص شده و در ادامه با ارزیابی پارامترهای ذاتی در هریک از آنها شدت و موقعیت آسیب، تعیین شد [۵]. با وجود این که پارامترهای ذاتی در یک سازه اطلاعات مفیدی از پایش سلامت آن ارائه می‌کنند، اما بعضی از آنها برای آسیب‌یابی مناسب نبوده و نمی‌توان با استفاده از این پارامترها موقعیت دقیق آسیب را در طول یک عضو سازه تعیین نمود. به طور مثال، نسبت میرایی ذاتی در یک سازه نسبت به شرایط محیطی بسیار حساس است و عموماً نمی‌توان با استفاده از آن، سلامت یک سازه را بررسی نمود [۶].

پردازش سیگنال با استفاده از تبدیل موجک یک روش متداول دیگر است که به منظور ارزیابی پارامترهای مودال و در نتیجه، آسیب‌یابی تیرها مورد توجه قرار گرفته است. دوکا^۶ و همکاران، با پردازش مود اول ارتعاش تیر طره ترک‌خورده با استفاده از تبدیل موجک یک‌بعدی، موقعیت ترک را در طول تیر تخمین زدند. همچنین در این روش یک ضریب تشدید براساس ضرایب موجک به دست آمده، به منظور ارزیابی شدت ترک تعریف شد. با توجه به این که اشکال مودی یک سازه تابع تغییرات ماتریس‌های جرم و سختی می‌باشد و همچنین آسیب‌های سازه‌ای غالباً بر جرم و سختی سازه مؤثرند [۷]. روکا و ویلده^۷، مودهای ارتعاش یک تیر طره و یک صفحه فولادی آسیب‌دیده را با استفاده از اعمال تحریک ضربه تخمین زده و سپس با استفاده از تبدیل موجک گاوس-۴ یک و دوبعدی مودهای ارتعاشی تیر و صفحه موردنظر را پردازش نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر غیر صفر ضرایب موجک با موقعیت آسیب در عضو تناظر بالایی دارد [۸]. در یک پژوهش آزمایشگاهی بر روی یک تیر فولادی، مود اول ارتعاش تیر با استفاده از اعمال تحریک دینامیکی ضربه در طی افزایش میزان آسیب

^۶- Douka

^۷- Rucka and Wilde

^۸- Quek

اثرات لبه به منظور تشخیص، تعیین موقعیت و تعیین تغییر شدت آسیب‌های فزاینده در مدل اجزای محدود یک تیر فولادی با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل و دو سر گیردار استفاده می‌شود. در این مدل، آسیب فزاینده در یک موقعیت معین از طول تیر و در سه گام افزایشی با کاهش سختی در آن موقعیت ایجاد می‌شود. به منظور استخراج داده‌های لازم در طی روند افزایش میزان آسیب، تحریک دینامیکی ضربه با دامنه تصادفی و اخذ پاسخ جابه‌جایی به دفعات متعدد انجام می‌شود. با توجه به این که تبدیل موجک در سیگنال‌های ورودی با طول محدود، موجب تولید ضرایب موجک بسیار بزرگ در نقاط مرزی می‌شود، در مرحله بعد و قبل از انجام تبدیل موجک، برون‌یابی پاسخ‌های اخذ شده به سمت خارج از طول تیر پیشنهاد می‌شود تا بعد از تبدیل موجک شاهد نتایج بسیار بزرگ در حوالی تکیه‌گاه‌ها و در نتیجه، تفسیر غلط از آنها نباشیم. سپس نتایج برون‌یابی شده با روش‌های مختلف با استفاده از تبدیل موجک پردازش می‌شوند تا مؤثرترین روش مشخص گردد. موقعیت آسیب در طول تیر با بررسی اغتشاش موجود در مقادیر ضرایب موجک حاصل شده از هر سنجش تعیین می‌گردد. تغییر شدت آسیب فزاینده نیز از تغییر مقادیر ضرایب موجک در محل آسیب در طول سنجش‌های متعدد به دست می‌آید. در نهایت، اثر وجود نویز اندک در پاسخ‌های اخذ شده از تیر و همچنین وجود چند خرابی با میزان آسیب متفاوت در طول تیر بر فرآیند آسیب‌یابی پیشنهادی ارزیابی می‌شود.

۲- مشخصات مسأله

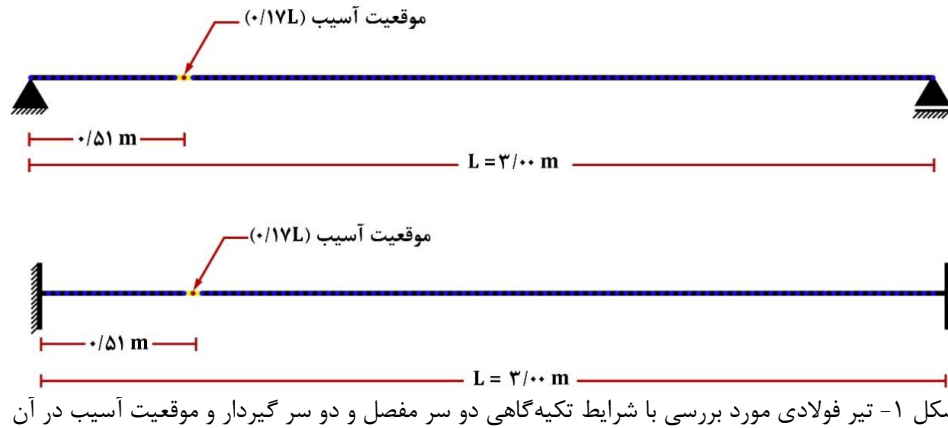
۲-۱- مشخصات تیر و آسیب‌های افزایشی

مطابق شکل ۱، تیر مورد بررسی یک تیر فولادی I شکل (W150×37) به طول سه متر ($L=3$ m) با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل و دو سر گیردار می‌باشد. محل آسیب افزایشی در فاصله $0.17L$ از سمت تکیه‌گاه چپ در نظر گرفته شده است.

به صورت نسبت تغییر انرژی موجک، شناسایی آسیب انجام یافت [۱۳]. در پژوهشی دیگر نیز آسیب در تیر فولادی با کاهش مدول الاستیسیته مدل‌سازی شده و با پردازش مودهای اول، دوم و سوم تیر با استفاده از تبدیل موجک، آسیب و موقعیت آن شناسایی گردید [۱۴]. کاهش سختی در المان‌ها از طریق کاهش مدول الاستیسیته در مدل اجزای محدود تیر مختلط فولادی-بتنی نیز به منظور مدل‌سازی آسیب مورد استفاده بوده است. در ادامه، از تغییرات انرژی کرنشی مودال با استفاده از شبکه عصبی، آسیب‌یابی انجام شده است [۱۵]. علاوه بر تیرها، در یک سازه به صورت قاب فولادی چهار طبقه نیز مدل‌سازی آسیب از طریق تغییر مدول الاستیسیته در تعدادی اعضا صورت گرفته است. این سازه، قبلاً در مرکز تحقیقات لرزه‌ای دانشگاه بریتیش کلمبیا تحت آزمایش قرار گرفته بود و مقایسه نتایج حاکی از موفقیت روش مدل‌سازی آسیب و استفاده از تحلیل موجک برای تشخیص خرابی سازه است [۱۶].

یکی دیگر از مسائل مهم در فرآیند آسیب‌یابی با استفاده از تبدیل موجک، وجود نویز محیطی و خطا در سنجش داده‌ها است. در مطالعات تجربی عملاً تا حدودی نویز و خطا در سنجش وجود خواهد داشت؛ بنابراین در مطالعات عددی، شبیه‌سازی این پدیده می‌تواند بسیار مفید باشد. معمولاً برای این منظور از اضافه کردن نویز سفید گاوسی به پاسخ شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. این کار در مورد مدل تیر فولادی، ورق فولادی، ورق کامپوزیت و قاب ساختمانی چندطبقه انجام شده است [۱۳، ۱۷-۱۹].

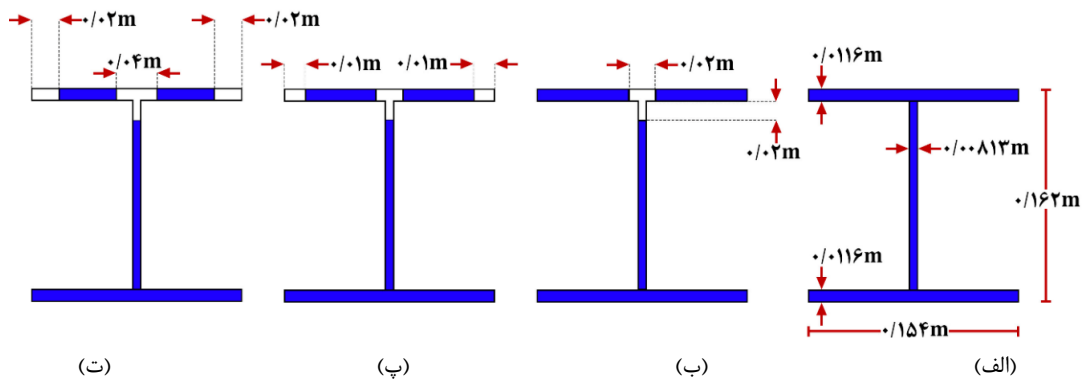
اگرچه مطالعات متعددی در رابطه با آسیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از تبدیل موجک صورت گرفته است (که به برخی از آنها در بالا اشاره شد)، ولی همچنان برخی جنبه‌های موضوع نظیر یافتن روش‌های مؤثر برای کاهش اثرات لبه در تبدیل موجک به خصوص زمانی که با تغییر شدت آسیب مواجه هستیم، هنوز جای بررسی دارد. بنابراین در پژوهش حاضر، از تبدیل موجک با کاهش



در مقایسه با گشتاور اینرسی مقطع سالم (I_0) در جدول ۱ گزارش شده است. مشاهده می‌شود که در سطوح فرض آسیب E_1 ، E_2 و E_3 کاهش سختی به ترتیب در حدود ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد می‌باشد. همچنین در این جدول عمق ترک فرضی ناشی از نقص در مقطع مستطیلی معادل که هم ارتفاع با مقطع آ شکل باشد (به ارتفاع h_0) با توجه به رابطه زیر محاسبه و گزارش شده است:

$$\frac{h_c}{h_0} = 1 - \sqrt[3]{\frac{I_c}{I_0}} \quad (1)$$

با توجه به اینکه در مرحله مدل‌سازی اجزای محدود تیر مذکور، مش‌بندی آن با ۱۰۰ المان (هرکدام به طول $0.1L$) و در نتیجه، ۱۰۱ گره انجام می‌یابد، موقعیت آسیب در گره ۱۸ با ایجاد تغییر در سختی المان‌های مجاور، یعنی المان‌های ۱۷ و ۱۸ از سمت تکیه‌گاه چپ می‌باشد. در این پژوهش، سه سطح آسیب E_1 ، E_2 و E_3 مطابق شکل ۲، با فرض وجود نقص در قسمت‌هایی از مقطع و در نتیجه حذف اثر آن قسمت‌ها در سختی خمشی تیر لحاظ می‌شود. گشتاور اینرسی مقطع آسیب‌دیده در سه سطح مختلف به صورت I_c محاسبه و



شکل ۲- مقطع تیر مورد بررسی در حالت (الف) سالم، (ب) آسیب‌دیده در سطح E_1 ، (پ) آسیب‌دیده در سطح E_2 و (ت) آسیب‌دیده در سطح E_3

جدول ۱- مشخصات مقاطع سالم و آسیب‌دیده تیر فولادی دو سر گیردار و دو سر مفصل

سطح آسیب	گشتاور اینرسی (mm^4)	I_c/I_0	کاهش سختی (%)	عمق ترک در مقطع معادل مستطیلی	تحریک و سنجش پاسخ
E_1	$1/999 \times 10^7$	۰/۹۰۶	۹/۴	$0.32 h_0$	۱ تا ۲۰
E_2	$1/747 \times 10^7$	۰/۷۹۲	۲۰/۸	$0.75 h_0$	۲۱ تا ۴۰
E_3	$1/553 \times 10^7$	۰/۷۰۴	۲۹/۶	$0.11 h_0$	۴۱ تا ۶۰

۲-۲- مدل اجزای محدود تیر آسیب‌دیده و تحریک آن

الاستیسیته آن که در نرم‌افزار راحت‌تر اعمال می‌شود، در نظر گرفته شد.

براساس مطالعات سالوو، وجود آسیب در یک سازه بر فرکانس‌های طبیعی آن اثرگذار خواهد بود. بر این اساس، از اثرات تغییر سختی بر فرکانس‌های طبیعی یک سازه زمانی به عنوان آسیب قطعی می‌توان یاد کرد که این تغییرات بیش از پنج درصد باشد [۳]. بنابراین به منظور بررسی تغییر فرکانس‌های طبیعی در طول افزایش شدت آسیب، در اولین گام، تحلیل فرکانسی بر روی تیر با شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار و دو سر مفصل انجام شده و فرکانس طبیعی اول آن در سه سطح آسیب مطابق جدول ۲ به دست آمد. با توجه به جدول ۲، ملاحظه می‌شود که با اعمال آسیب و افزایش شدت آن در محل مفروض، فرکانس طبیعی اول تیر نیز کاهش می‌یابد؛ ولی مقدار تغییر آن در تمام سطوح آسیب بسیار کمتر از پنج درصد می‌باشد.

مدل‌سازی اجزای محدود تیر مفروض در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۲۲ انجام شده است. هندسه تیر مورد نظر در فضای دوبعدی به شکل هندسی Wire تعریف گردید و کل طول تیر با ۱۰۱ المان دو گرهی که اندازه هر کدام 0.03 m ($L/10$) است، مش‌بندی گردید. همچنین مطابق شکل ۱، قیده‌های تکیه‌گاهی تیر یک بار به صورت دو سر گیردار و بار دیگر به صورت دو سر مفصل در گام تحلیل سازه اعمال شد.

سپس مشخصات هندسی مقطع به هندسه مدل شده اختصاص یافت. در این مدل، مدول الاستیسیته فولاد 2×10^{11} پاسکال، ضریب پواسون 0.3 و چگالی آن 7850 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه سختی خمشی مقطع وابسته به ممان اینرسی و مدول الاستیسیته مصالح می‌باشد (EI)، به جای کاهش ممان اینرسی مقطع در محل آسیب، کاهش مدول

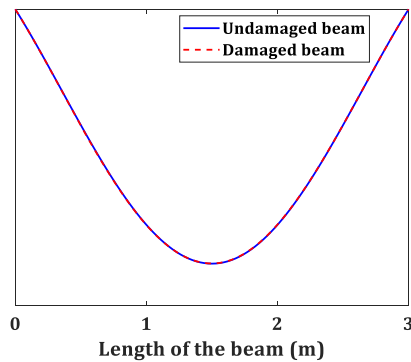
جدول ۲- میزان تغییر فرکانس طبیعی اول تیر فولادی بر اثر کاهش سختی ناشی از آسیب

سطح آسیب	فرکانس طبیعی (Hz)	زمان تناوب (s)	درصد کاهش فرکانس طبیعی
سالم	۱۲۶/۸۸	۰/۰۰۷۸۸۱	-
E ₁	۱۲۶/۸۳	۰/۰۰۷۸۸۵	۰/۰۴
E ₂	۱۲۶/۷۵	۰/۰۰۷۸۹۰	۰/۱۰
E ₃	۱۲۶/۶۸	۰/۰۰۷۸۹۴	۰/۱۶
سالم	۵۹/۱۹	۰/۰۱۶۸۹	-
E ₁	۵۹/۱۶	۰/۰۱۶۹۰	۰/۰۵
E ₂	۵۹/۱۱	۰/۰۱۶۹۲	۰/۱۴
E ₃	۵۹/۰۶	۰/۰۱۶۹۳	۰/۲۲

شناسایی ناپیوستگی‌های اندک ناشی از آسیب، در پیش گرفته می‌شود. بار دینامیکی ضربه مثلثی، مطابق شکل ۴ در وسط دهانه تیر اعمال گردید که دامنه آن به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نیوتون می‌باشد. بدین ترتیب، ۶۰ مرتبه تحریک دینامیکی و اخذ پاسخ اوج جابه‌جایی از کلیه ۱۰۱ گره تیر انجام یافت که

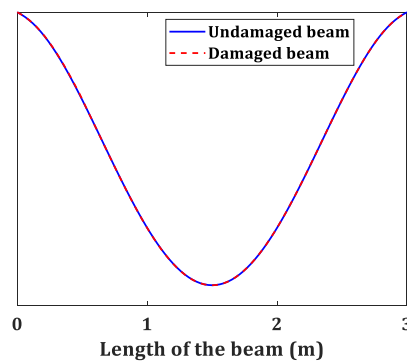
شکل مود اول ارتعاش تیر در حالت سالم و آسیب‌دیده در سطح آسیب E₃ نیز در شکل ۳ نشان داده شده است که عدم تفکیک حالت سالم و آسیب‌دیده مشهود است. بنابراین برای مقادیر اندک آسیب در نظر گرفته شده در این پژوهش، تحلیل مودال و فرکانسی سازه نمی‌تواند منجر به تخمین آسیب و موقعیت آن شود و استفاده از تبدیل موجک پاسخ دینامیکی سازه برای

آسیب E_1 ، E_2 و E_3 بود.



(ب)

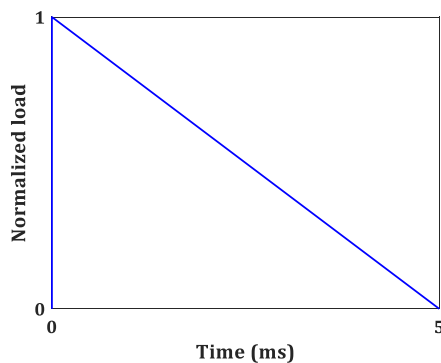
۲۰ مرتبه اول، دوم و سوم به ترتیب بر روی تیر با سطح



(الف)

شکل ۳- مود اول ارتعاش تیر سالم و آسیب دیده در سطح E_3 با شرایط تکیه گاهی (الف) دو سر گیردار و (ب) دو سر مفصل

ورودی را از فضای زمان یا مکان به فضای فرکانس نگاشت می دهد [۲۰].



شکل ۴- بار ضربه مثلثی

نقطه ضعفی که در فرآیند پردازش سیگنال با استفاده از تبدیل فوریه رخ می دهد این است که اطلاعات وابسته به زمان یا مکان در فضای فرکانسی حذف شده و امکان تعیین موقعیت یا زمان یک پدیده در سیگنال اصلی از بین می رود. به منظور رفع این نقص تبدیل زمان کوتاه فوریه پیشنهاد شده است [۲۱]. در این روش، تابع تبدیل فوریه سیگنال اصلی را به یک تابع خروجی دوبعدی از زمان یا مکان و فرکانس نگاشت می دهد. نتایج حاصل از این روش نیز به دلیل دقت محدود در بازه زمان کوتاه قادر به ارائه اطلاعات مورد نیاز از یک پدیده ناگهانی در سیگنال اصلی با وضوح بالا نمی باشد. به منظور رفع نقاط ضعف مذکور تبدیل موجک به عنوان یک راهبرد مطلوب برای برقراری تعادل بهینه بین دقت مکان یا زمان و فضای فرکانسی پیشنهاد شده است.

پاسخ های جابه جایی اخذ شده به صورت یک ماتریس $m \times n$ مطابق رابطه (۲) ثبت گردید که در آن $m=60$ برابر تعداد تکرار سنجش^۹ و $n=101$ تعداد نقاط اخذ پاسخ می باشد. این ماتریس 60×101 را می توان مطابق رابطه (۳) به صورت سه زیر ماتریس که هر کدام متناظر با سنجش های یک سطح آسیب هستند، نشان داد.

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m1} & u_{m2} & u_{m3} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

۳- تبدیل موجک پیوسته

یکی از روش های اولیه و متداول در زمینه پردازش سیگنال، تبدیل فوریه می باشد که با ضرب کردن سیگنال مورد نظر در سلسله ای از سیگنال های سینوسی مانا با فرکانس های مختلف عمل می کند. تبدیل فوریه، سیگنال

^۹- Measurement

در پژوهش حاضر، با توجه به اینکه بی‌نظمی‌های ناشی از آسیب در تابع سیگنال ورودی ملموس نمی‌باشد، از تبدیل موجک پیوسته به منظور آشکارسازی آنها استفاده می‌شود. هرگونه ناپیوستگی و بی‌نظمی ناشی از آسیب در سیگنال ورودی را می‌توان با تغییرات شدید و ناگهانی در توزیع ضرایب موجک مشاهده نمود که این امر شالوده استفاده از تبدیل موجک برای آسیب‌یابی را شکل می‌دهد [۲۳].

تابع موجک مادر مورد استفاده در پژوهش حاضر، موجک مورلت مختلط است. تابع موجک مادر مورلت از ایجاد تغییرات در دامنه و برد تابع گاوسی به دست آمده است. بنابراین هم نوع حقیقی و هم مختلط آن، یک تابع متقارن می‌باشد. در واقع تابع موجک مورلت از خانواده موجک گابور محسوب می‌شود [۲۴]. شکل کلی ریاضی تابع موجک مادر مورلت مختلط به صورت زیر می‌باشد:

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{i(2\pi f_c x)} e^{-\frac{x^2}{f_b}} \quad (6)$$

در رابطه بالا، f_b بیانگر پهنای باند و f_c نشان‌دهنده فرکانس مرکزی موجک می‌باشد. در شکل ۵، بخش حقیقی و موهومی تابع موجک مورلت با فرکانس مرکزی یک و پهنای باند یک و نیم در بازه $[-5, 5]$ نشان داده شده است.

۴- کاهش اثرات لبه در تبدیل موجک

پاسخ دینامیکی تیر مورد نظر تحت اثر بار ضربه به عنوان ورودی تبدیل موجک، یک سیگنال نامتناوب با طول محدود است. مطابق مطالب بخش قبل، تبدیل موجک به عنوان یک عملگر انتگرالی کانولوشن، سیگنال اصلی را با تابع موجک مادر درگیر می‌کند. با توجه به اینکه تابع موجک مادر طول محدودی داشته و وابسته به پارامترهای مقیاس و شاخص مکانی/ زمانی می‌باشد، ضرایب موجک حاصل از پردازش پاسخ تیر، در نقاط تکیه‌گاهی تغییرات و افزایش شدیدی خواهند داشت به

در تبدیل موجک برخلاف تبدیل فوریه، به جای توابع سینوسی و کسینوسی از توابع موجک پایه به منظور پردازش سیگنال استفاده می‌شود. توابع موجک پایه، دارای میانگین صفر و طول محدود بوده و با تغییر مقیاس بر طول کل سیگنال ورودی اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که توابع موجک، بسته به کاربردشان ممکن است به صورت حقیقی یا مختلط باشند. تابع موجک مادر که با تغییر مقیاس آن، مجموعه‌هایی از توابع موجک پایه ایجاد می‌شوند، مطابق رابطه زیر است [۲۲]:

$$\psi_{s,u}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-u}{s}\right) \quad (4)$$

در رابطه بالا، s بیانگر پارامتر مقیاس در تابع موجک مادر و u نشان‌دهنده شاخص مکانی یا زمانی آن (شیفت مکانی یا زمانی) می‌باشد. تاکنون توابع موجک متعددی پیشنهاد شده است که همه این توابع از دو قید متعامدسازی و نرمال‌سازی تبعیت می‌کنند. براساس این دو قید، تابع موجک مادر باید دارای انرژی محدود و میانگین صفر باشد تا ضرب داخلی سیگنال ورودی و موجک در بازه زمان یا مکان انتگرال‌پذیر گردد.

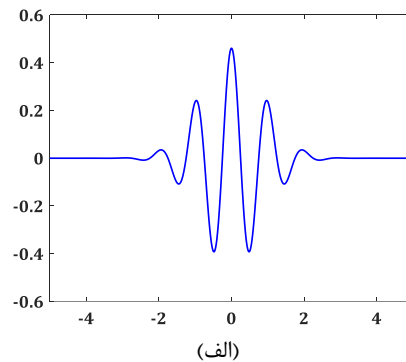
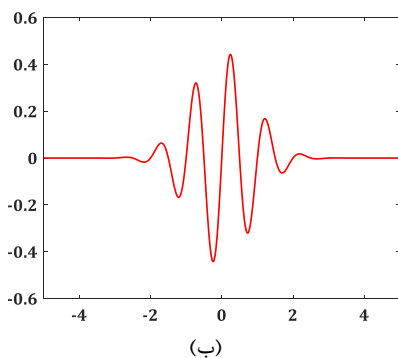
در این پژوهش، سیگنال ورودی به صورت پاسخ جابه‌جایی تیر مورد بررسی می‌باشد که یک ورودی یک‌بعدی با طول محدود محسوب می‌شود. بنابراین به منظور پردازش آن از تبدیل موجک پیوسته یک بعدی استفاده شده است. نتیجه حاصل از تبدیل موجک پیوسته یک بعدی روی سیگنال ورودی $f(x)$ به صورت ضرایب موجک C ناشی از انتگرال کانولوشن زیر می‌باشد:

$$C(s,u) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \psi^*\left(\frac{x-u}{s}\right) dx \quad (5)$$

در رابطه بالا، نماد * نشان‌دهنده تابع مزدوج مختلط می‌باشد. توجه شود در صورتی که تابع موجک مادر ψ حقیقی باشد، مزدوج مختلط آن، خودش خواهد بود. در تبدیل موجک، ضرایب موجک به دست آمده از مقیاس‌ها و شیفت‌های مختلف، میزان همبستگی تابع موجک مادر را با سیگنال ورودی نشان می‌دهد.

طوری که تأثیر آسیب را پوشش داده و ممکن است

موجب اشتباه در تفسیر نتایج گردد [۲۵].



شکل ۵- موجک مادر مورلت ($f_b = 1/5$ و $f_c = 1$) در بازه $[-5, 5]$: (الف) بخش حقیقی و (ب) بخش موهومی

می‌شود. در این روش حداقل چهار داده درون بازه مورد نیاز است.

(پ) روش اسپیلاین مکعبی: در این روش از یک چند جمله‌ای مرتبه سوم برای به دست آوردن نقاط جدید در خارج از بازه استفاده می‌شود. بنابراین وجود حداقل چهار داده درون بازه الزامی است. در انتهای این بخش و قبل از ارائه نتایج، فرآیند آسیب‌یابی پیشنهادی در قالب فلوجارتی در شکل ۶ ارائه می‌شود.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- بررسی نتایج تبدیل موجک تحت تأثیر اثرات لبه

پاسخ جابه‌جایی تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل تحت اثر بار دینامیکی ضربه از ۶۰ سنجش به دست آمده است که به عنوان نمونه در شکل ۷- الف و ب، برای سنجش ۵۰ام یعنی یکی از سنجش‌های متناظر با سطح آسیب E_3 نشان داده شده است.

با فرض هریک از پاسخ‌های جابه‌جایی به عنوان یک سیگنال ورودی برای تبدیل موجک، نتایج متناظر با هر سنجش به صورت ضرایب موجک مختلط در طول تیر و در میان مقیاس‌های مختلف به دست می‌آید (با توجه به تعداد داده‌های ورودی، نتایج ۳۸ مقیاس توسط MATLAB محاسبه شده است).

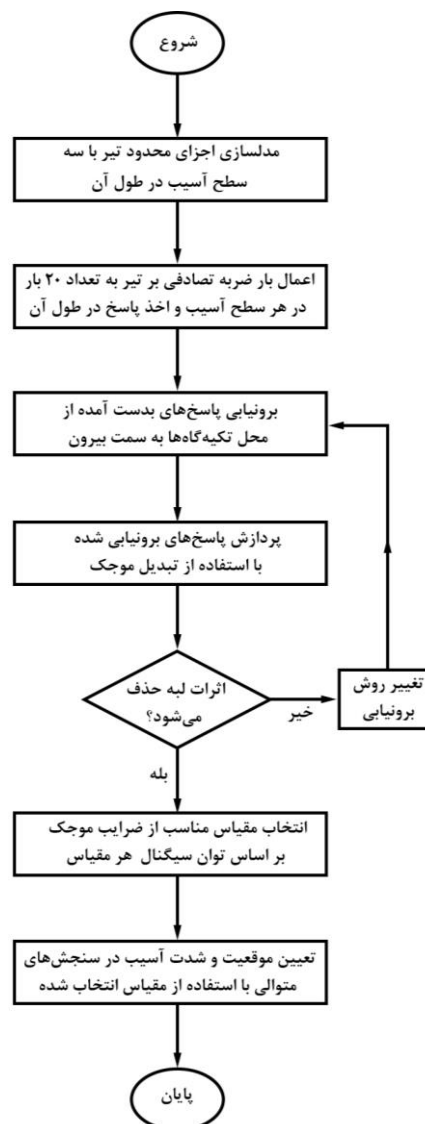
به منظور کاهش اثرات مرزی (لبه) در نتایج تحلیل موجک، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. بسط سیگنال به روش Symmetrization, Linear padding, Smooth padding و روش بسط چندجمله‌ای از جمله مواردی می‌باشند که در روند آسیب‌یابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما آزمودن آنها در پژوهش حاضر نشان داد که کارایی بالایی برای حل این مسئله ندارند [۲۶-۲۸]. بنابراین روش‌های پیشرفته‌تر دیگری برای برون‌یابی داده‌های تغییر مکان تیر به سمت خارج تکیه‌گاه‌ها آزموده می‌شود تا بهترین روش برای کاهش اثرات لبه در تبدیل موجک انتخاب گردد. این روش‌های برون‌یابی، که در نرم‌افزار MATLAB جزوی از حالت کلی درون‌یابی محسوب می‌شوند، عبارتند از:

(الف) روش برون‌یابی خطی: در این روش، نقاط جدید براساس نقاط داده موجود با استفاده از معادله یک خط به دست می‌آید. بنابراین شرط لازم برای برون‌یابی، وجود حداقل دو داده درون بازه می‌باشد. محاسبات عددی برون‌یابی خطی مانند عملیات درون‌یابی بوده و نقاط داده جدید در خارج از بازه براساس معادله خط مذکور به دست می‌آید.

(ب) روش برون‌یابی مکعبی تکه‌ای: در این روش از چندجمله‌ای‌های مکعبی هرمیتی به منظور برون‌یابی نقاط جدید در خارج از بازه استفاده

به منظور کاهش اثرات لبه در تبدیل موجک، سیگنال‌های ورودی با استفاده از سه روش برون‌یابی توصیف شده در بخش ۴، به تعداد ۳۲ نقطه، هرکدام به فواصل ثابت $L/0.1$ ($m/0.3$) از هر تکیه‌گاه به سمت خارج از بازه طول تیر برون‌یابی شد. بنابراین تعداد نقاط داده در هر پاسخ جابه‌جایی از ۱۰۱ به ۱۶۵ نقطه افزایش پیدا کرده و طول سیگنال هم از ۳ m به $4/92$ m افزوده شد. در تبدیل موجک افزایش تعداد نقاط داده موجود در سیگنال ورودی بر میزان وضوح آن می‌افزاید و به دنبال آن موجب افزایش تعداد مقیاس‌های ضرایب موجک می‌شود. به این ترتیب مقیاس‌های مورد محاسبه توسط متلب از ۳۸ مقیاس به ۴۵ مقیاس افزایش یافت.

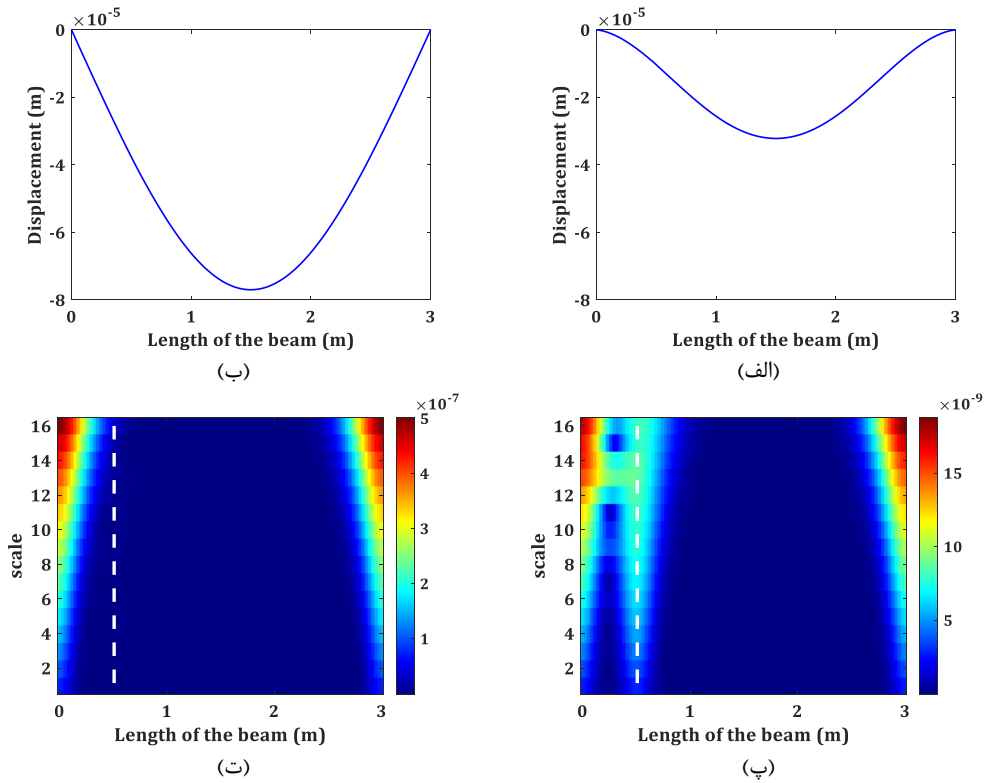
در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب نتایج حاصل از برون‌یابی پاسخ جابه‌جایی تیر به سه روش برون‌یابی خطی، مکعبی تکه‌ای و اسپیلاین مکعبی از سنجش ۱۵۰ (در سطح آسیب E_3) و مقادیر ضرایب موجک حاصل از آن‌ها در ۱۶ مقیاس اول ملاحظه می‌شود. در شکل‌های مذکور، کانتور رنگی ضرایب موجک پس از برون‌یابی پاسخ جابه‌جایی، فقط در بازه طول تیر تنظیم شده و محل آسیب مفروض به‌صورت خط‌چین سفید مشخص گردیده است. از مقایسه ضرایب موجک شکل‌های ۸ تا ۱۰ با شکل ۷، ملاحظه می‌شود که هر سه روش برون‌یابی توانسته است که از اثرات منفی لبه بر آسیب‌یابی بکاهد، ولی وضوح آسیب و محو شدن اثرات لبه، مخصوصاً در مورد تیر دو سر گیردار، از شکل ۸ تا ۱۰ بهتر گشته است. به طوری که در شکل ۱۰، تضعیف اثرات لبه در نتیجه برون‌یابی اسپیلاین مکعبی نسبت به روش‌های برون‌یابی خطی و مکعبی تکه‌ای در هر دو تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل بیشتر بوده و تأثیر آسیب بر ضرایب موجک با وضوح بالاتری نمایان شده است. بنابراین روش برون‌یابی اسپیلاین مکعبی به عنوان یک روش مطلوب برای کاهش اثرات لبه در روند آسیب‌یابی تیرها با استفاده از تبدیل موجک پیوسته نتیجه می‌شود.



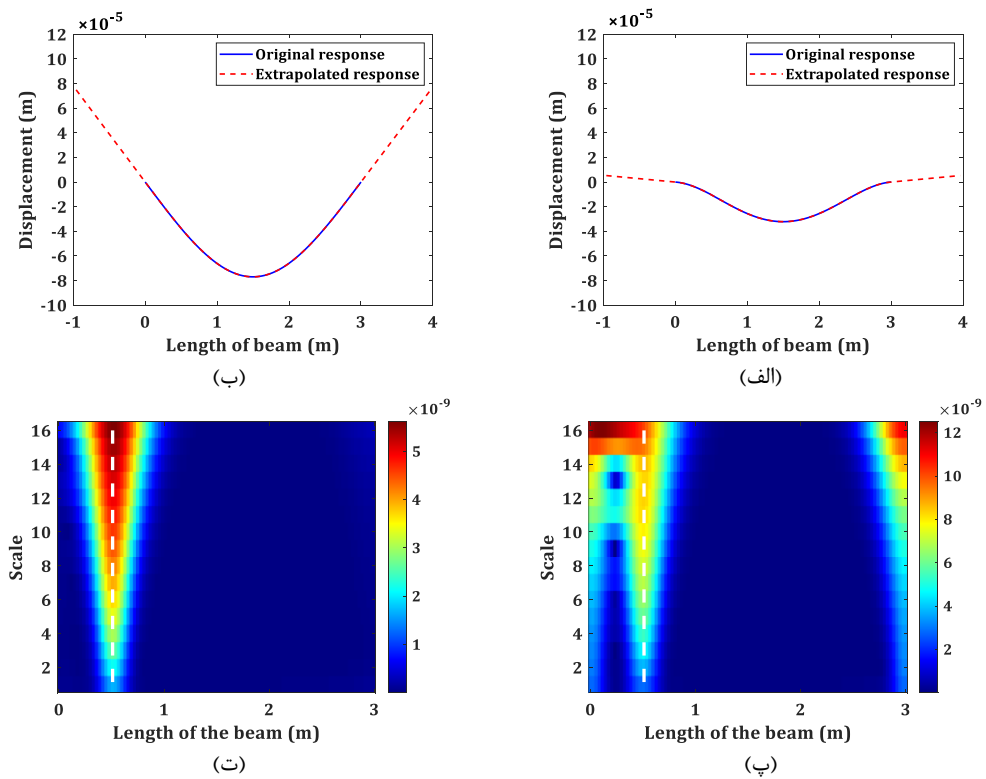
شکل ۶- فلوجارت فرآیند آسیب‌یابی

در شکل ۷- ب و پ، اندازه ضرایب موجک مختلط به‌دست آمده از پردازش پاسخ تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل از سنجش ۱۵۰ در ۱۶ مقیاس اول ملاحظه می‌شود. محل آسیب نیز با خط‌چین سفید نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که در مقیاس‌های بالاتر اندازه ضرایب موجک در نقاط تکیه‌گاهی بسیار بزرگ بوده است، به طوری که تأثیر آسیب را پوشش داده و تا حد زیادی مانع از تعیین محل آن می‌شود. برای حذف یا کاهش این اثرات که اثرات لبه نامیده می‌شود، در قسمت بعدی اقدام خواهد شد.

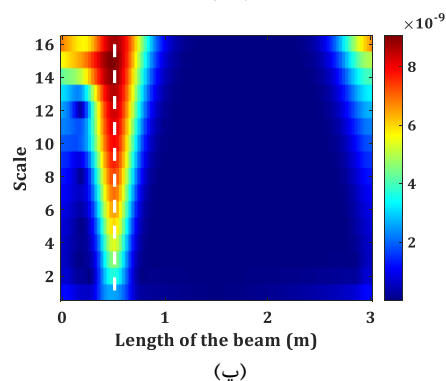
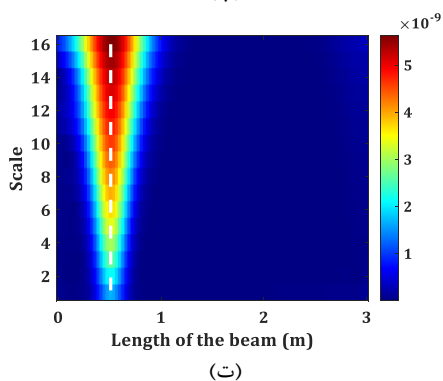
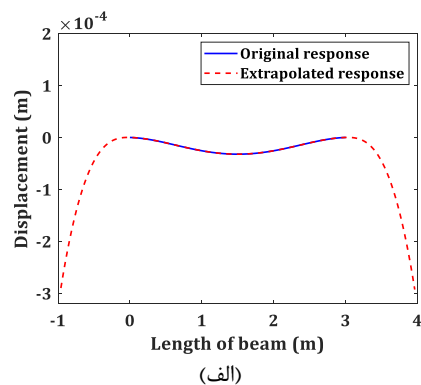
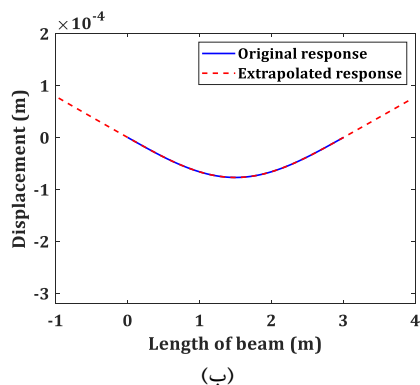
۵-۲- ارزیابی تأثیر روش‌های برون‌یابی بر کاهش اثرات لبه



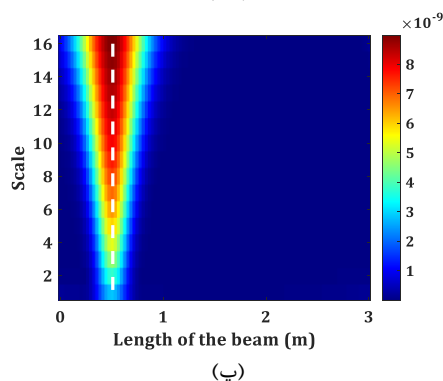
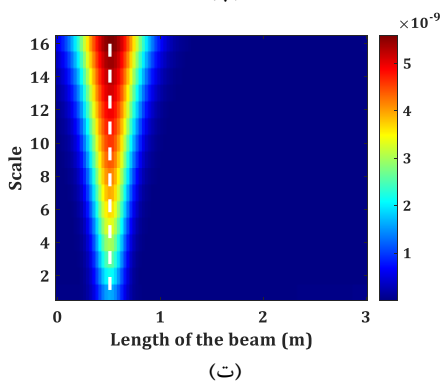
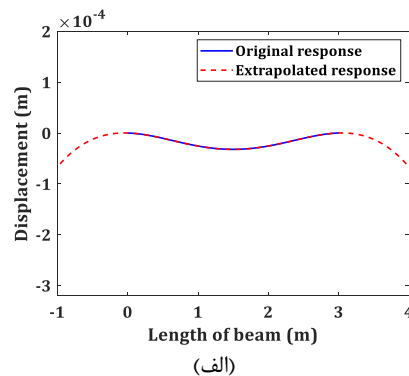
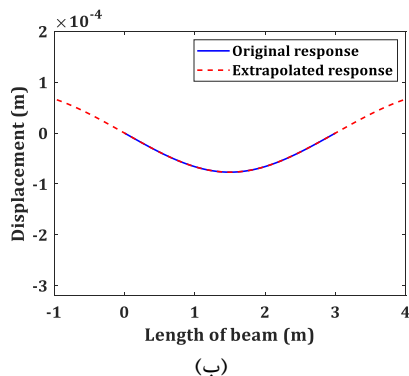
شکل ۷- پاسخ جابه‌جایی تیر (الف) دو سر گیردار، (ب) دو سر مفصل تحت اثر بار ضربه در سطح آسیب E_3 در سنجش ۱۵۰ و اندازه ضرایب موجک متناظر با پاسخ تیر، (پ) دو سر گیردار و (ت) دو سر مفصل در ۱۶ مقیاس اول



شکل ۸- پاسخ جابه‌جایی برون‌یابی شده به روش خطی در تیر (الف) دو سر گیردار، (ب) دو سر مفصل تحت بار ضربه در سطح آسیب E_3 در سنجش ۱۵۰ و اندازه ضرایب موجک متناظر با پاسخ تیر، (پ) دو سر گیردار و (ت) دو سر مفصل در ۱۶ مقیاس اول



شکل ۹- پاسخ جابه‌جایی برون‌یابی شده به روش مکعبی تکه‌ای در تیر (الف) دو سر گیردار، (ب) دو سر مفصل تحت بار ضربه در سطح آسیب E_3 در سنجهش ۱۵۰ام و اندازه ضرایب موجک متناظر با پاسخ تیر، (پ) دو سر گیردار و (ت) دو سر مفصل در ۱۶ مقیاس اول



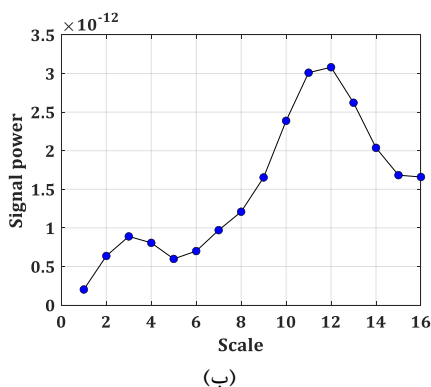
شکل ۱۰- پاسخ جابه‌جایی برون‌یابی شده به روش اسپیلاین مکعبی در تیر (الف) دو سر گیردار، (ب) دو سر مفصل تحت بار ضربه در سطح آسیب E_3 در سنجهش ۱۵۰ام و اندازه ضرایب موجک متناظر با پاسخ تیر، (پ) دو سر گیردار و (ت) دو سر مفصل در ۱۶ مقیاس اول در مورد حساسیت نتایج حاصل به شرایط تکیه‌گاهی می‌توان گفت قبل از برون‌یابی نتایج و در حالی

یک سیگنال فرض شده و مقدار توان آن مطابق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$P_C = \frac{1}{d} \int_{u_0}^{u_0+d} |C(u)|^2 du \quad (7)$$

در رابطه بالا، u_0 نقطه ابتدایی بازه طول تیر و d بیانگر طول آن می‌باشد. در شکل ۱۱، مقدار توان هر مقیاس از ضرایب موجک حاصل از سنجش و پردازش ۵۰ام تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل ملاحظه می‌شود. مطابق این شکل، مقیاس ۱۶م در تیر دو سر گیردار و مقیاس دوازدهم در تیر دو سر مفصل دارای بیشترین توان بوده و به عنوان مقیاس‌هایی که بیشترین وضوح آسیب را ارائه می‌کنند، برای ادامه کار انتخاب گردید.

در شکل ۱۲، ضرایب موجک به دست آمده از مقیاس ۱۶م برای تیر دو سر گیردار و مقیاس ۱۲م برای تیر دو سر مفصل در سنجش ۵۰ام ملاحظه می‌شود. با توجه به این که مقادیر ضرایب موجک مختلط می‌باشند، اندازه و قسمت حقیقی و مختلط آنها به طور مجزا ترسیم شده است. همچنین مطابق شکل ۱۲، موقعیت دقیق آسیب با خط چین سیاه نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که مکان اوج ضرایب موجک دقیقاً منطبق بر محل آسیب است و به این ترتیب محل آسیب با دقت بسیار بالا و با حذف اثرات لبه به دست آمده است.

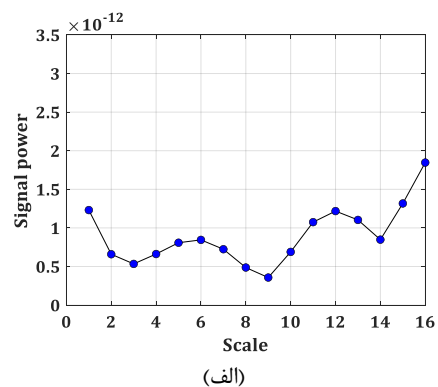


ولی در تیر دو سر مفصل به هیچ‌وجه آسیب قابل شناسایی نیست (شکل ۷ ملاحظه شود). با اعمال روش‌های برون‌یابی مختلف مشاهده می‌شود که در تیر دو سر مفصل هر سه روش برون‌یابی موجب حذف کامل اثرات لبه می‌شوند، ولی در تیر دو سر گیردار فقط روش اسپیلان مکعبی به صورت کامل و ایده‌آل اثرات لبه را حذف می‌کند، اگرچه سایر روش‌ها نیز باعث کاهش اثرات لبه می‌شوند (اشکال ۸ تا ۱۰ ملاحظه شود).

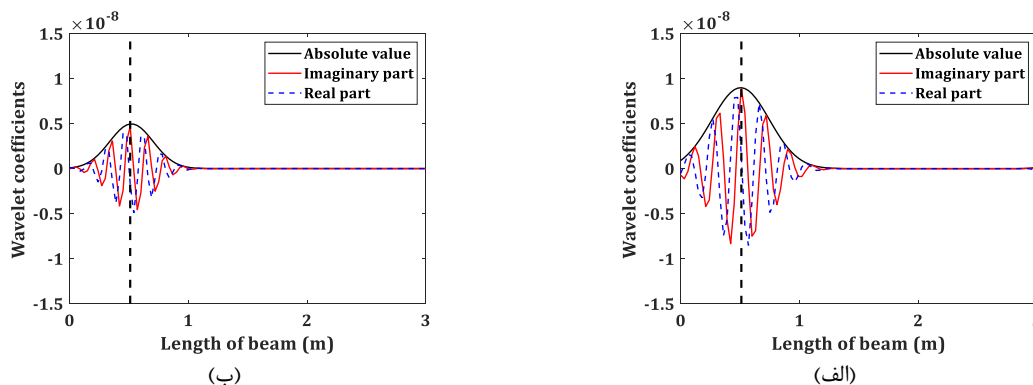
۳-۵- ارزیابی آسیب‌های فزاینده براساس ضرایب موجک

با پردازش پاسخ‌های به دست آمده از ۶۰ سنجش پس از برون‌یابی آنها به روش اسپیلان مکعبی، ضرایب موجک در ۴۵ مقیاس برای هر کدام از پاسخ‌ها به دست آمد. مطابق قسمت قبل، با توجه به این که کاهش اثرات لبه به روش‌های مختلف برون‌یابی تا ۱۶ مقیاس اول اثرگذار بوده است، بنابراین به منظور اهداف آسیب‌یابی تنها ۱۶ مقیاس اول انتخاب گردید. در واقع، افزایش پارامتر مقیاس (S) موجب بازشدگی بیشتر موجک و کاهش آن موجب فشردگی موجک می‌شود. بنابراین پارامتر مقیاس رابطه معکوس با مفهوم فرکانس (یا به عبارت دقیق‌تر شبه‌فرکانس) در تبدیل موجک دارد.

برای تعیین مناسب‌ترین مقیاس از بین ۱۶ مقیاس اول نیز اندازه ضرایب موجک به دست آمده از هر مقیاس



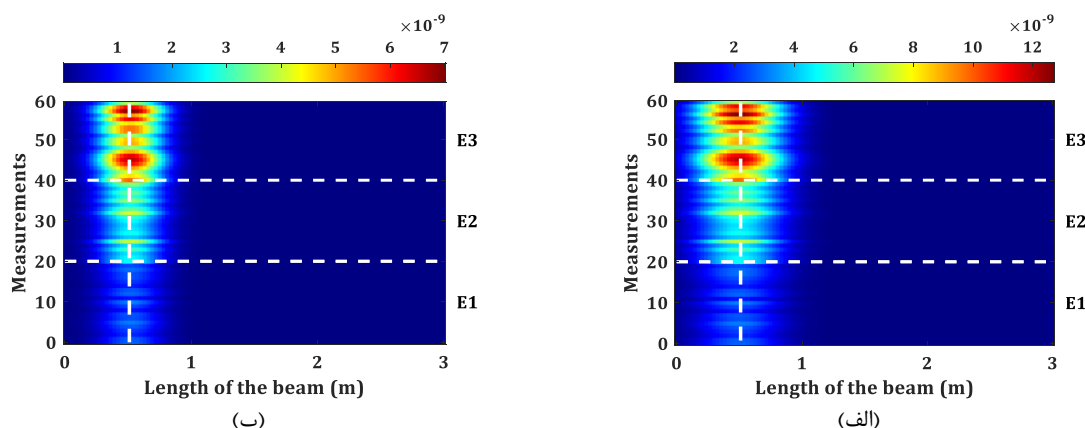
شکل ۱۱- توان ضرایب موجک حاصل از سنجش ۵۰ام (در سطح آسیب E_3) در ۱۶ مقیاس اول در تیر (الف) دو سر گیردار و (ب) دو سر مفصل



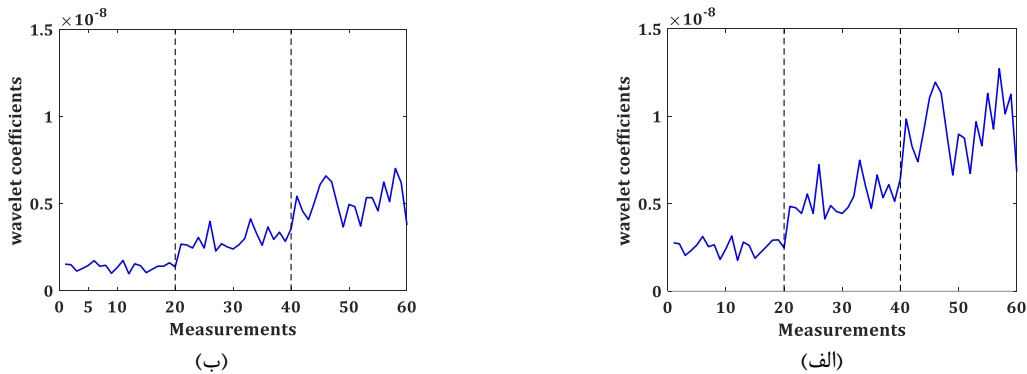
شکل ۱۲- ضرایب موجک به‌دست آمده از سنجش ۱۵۰ام (در سطح آسیب E_3) در (الف) مقیاس ۱۶ام تیر دو سر گیردار و (ب) مقیاس ۱۲ام تیر دو سر مفصل

به منظور ارزیابی دقیق‌تر امکان تخمین تغییرات سطح آسیب در طی ۶۰ سنجش، اندازه ضرایب موجک در محل آسیب در شکل ۱۴ آورده شده است. همچنین با خط‌چین سیاه تغییر تراز آسیب نیز نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش سطح آسیب در طول ۶۰ سنجش از E_1 به E_2 و از E_2 به E_3 ، اندازه ضرایب موجک به صورت معنی‌داری در هر مرحله افزایش یافته‌اند. بنابراین در هر دو تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل، روش به‌کار گرفته شده در این مقاله می‌تواند هم محل آسیب و هم افزایش آسیب را در طی سنجش‌های متوالی با دقت بالایی تخمین بزند.

در شکل ۱۳، اندازه ضرایب موجک به‌دست آمده از کلیه ۶۰ سنجش برون‌یابی شده به روش اسپیلاین مکعبی در مقیاس ۱۶ام تیر دو سر گیردار و در مقیاس ۱۲ام تیر دو سر مفصل نشان داده شده است. در این شکل، محل آسیب با خط‌چین قائم سفید و تغییر سطح آسیب از E_1 به E_2 و از E_2 به E_3 در طول سنجش‌ها با خط‌چین‌های افقی سفید مشخص گردیده است. مشاهده می‌شود که مقادیر ضرایب موجک در محل آسیب نسبت به سایر نقاط طول تیر بسیار بزرگ‌تر بوده و مقادیر ضرایب موجک در طی تمام ۶۰ سنجش، موقعیت آسیب را دقیقاً در طول تیر نشان می‌دهد. همچنین افزایش سطح آسیب به صورت افزایش مقادیر ضرایب موجک در محل آسیب مشهود است.



شکل ۱۳- اندازه ضرایب موجک به‌دست آمده از ۶۰ سنجش برون‌یابی شده در (الف) مقیاس ۱۶ام تیر دو سر گیردار و (ب) مقیاس ۱۲ام تیر دو سر مفصل



شکل ۱۴- اندازه ضرایب موجک در محل آسیب در طول ۶۰ سنجش در (الف) مقیاس ۱۶م تیر دو سر گیردار و (ب) مقیاس ۱۲م تیر دو سر مفصل

عضو استفاده کردند. مطابق نتایج به دست آمده در پژوهش مذکور که در اشکال ارائه شده کاملاً مشهود است، اثرات لبه بر ضرایب موجک حاصل از پردازش مودهای اول، دوم و سوم اثرگذار بوده و ضرایب موجک بزرگ هم در محل آسیب و هم در مجاورت تکیه‌گاه‌ها ایجاد شده‌اند [۱۴]. این در حالی است که در مطالعه حاضر، اثرات لبه با استفاده از روش برون‌یابی اسپیلاین مکعبی حذف شده و موقعیت و شدت آسیب با دقت و وضوح خوبی تعیین گردیده است.

۵-۵- اثر وجود نویز و وجود چند آسیب در طول تیر

در بخش‌های قبلی، مؤثر بودن برون‌یابی پاسخ‌های اخذ شده از تیر در فرآیند آسیب‌یابی با استفاده از تبدیل موجک وقتی آسیب افزایش‌یابنده در یک نقطه از تیر وجود داشته باشد، نشان داده شد. در اینجا مؤثر بودن روش به کار گرفته شده، وقتی هم‌زمان دو سناریوی جدید به مساله اضافه می‌شوند، بررسی می‌گردد.

مورد اول، اثر وجود چند خرابی با میزان آسیب متفاوت در طول تیر می‌باشد. برای این منظور، در تیر دو سر گیردار مورد استفاده در بخش‌های قبل، علاوه بر محل آسیب قبلی در $0.17L$ (0.51 m) از تکیه‌گاه سمت چپ، آسیب دوم نیز در $0.60L$ (1.80 m) از تکیه‌گاه سمت چپ در نظر گرفته می‌شود. آسیب اول با شدت E_3 و آسیب دوم با شدت E_2 فرض می‌گردد. بار ضربه نیز

۵-۴- ارزیابی دقت روش پیشنهادی در مقایسه با برخی روش‌های دیگر آسیب‌یابی

در اینجا روش پیشنهادی با دو روش آسیب‌یابی دیگر، یکی مبتنی بر پردازش موجک و دیگری بدون استفاده از تبدیل موجک، مقایسه می‌شود. برای روش بی‌نیاز از تبدیل موجک، می‌توان از تغییرات فرکانس‌های طبیعی سازه بهره برد. مطابق مطالعات سالوو، در شرایطی می‌توان به طور قطع در مورد وجود آسیب در یک عضو اطمینان حاصل کرد که تغییر فرکانس طبیعی آن در طی یک ارزیابی دوره‌ای بیش از پنج درصد باشد [۳]. مطابق نتایج ارائه شده در بخش ۲-۲ و جدول ۲ ملاحظه می‌شود که میزان کاهش فرکانس طبیعی هر دو تیر تحت اثر آسیب در هر سه سطح در نظر گرفته شده، بسیار کمتر از پنج درصد می‌باشد و در نتیجه، آسیب‌های فرضی با این روش قابل تشخیص نیستند. همچنین محل آسیب نیز با این روش قابل تشخیص نمی‌باشد. این در حالی است که در روش پیشنهاد شده، آسیب و محل آن با ایجاد ضرایب موجک بزرگ در مقایسه با سایر نقاط تیر، با دقت بالایی مشخص شده‌اند.

برای روش مبتنی بر تبدیل موجک نیز می‌توان به روش پیشنهادی اخیر خان‌احمدی و همکاران اشاره نمود. آنها یک مساله مشابه، یعنی تیر فولادی آسیب دیده را با کاهش سختی مدل‌سازی نموده و برای تشخیص و تعیین موقعیت آسیب از تبدیل موجک بر روی اشکال مودی

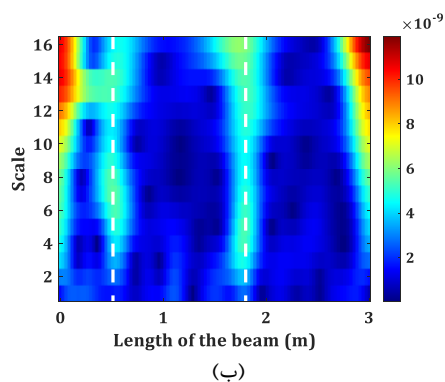
ذکر شده در بالا، نویز سفید گاوسی به میزان ۲ درصد با استفاده از دستور awgn در نرم‌افزار متلب مطابق روابط زیر محاسبه و اعمال می‌شود:

$$SNR = 20\log_{10}(1/n) \quad (۸)$$

$$S_n = awgn(u, SNR) \quad (۹)$$

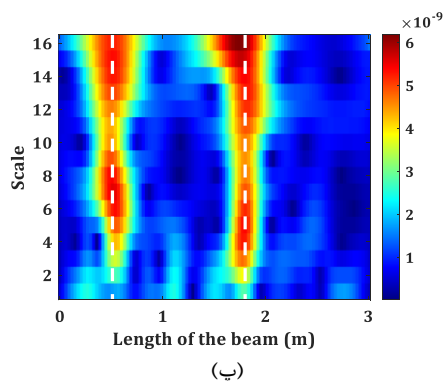
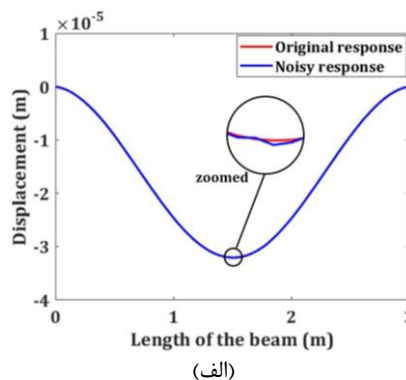
در روابط بالا، SNR نسبت سیگنال به نویز، n میزان نویز اعمال شده به سیگنال، u سیگنال اولیه (پاسخ اخذ شده از تیر) و S_n سیگنال پس از اعمال نویز می‌باشد [۱۳] و [۱۷].

نتایج حاصل از این بخش برای تیر دو سر گیردار تحت دو آسیب و با اعمال نویز، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شکل ۱۵-الف پاسخ اولیه را در مقایسه با پاسخ آغشته به نویز نشان می‌دهد. شکل ۱۵-ب و پ نیز به ترتیب نتایج حاصل از پردازش پاسخ‌های نویزدار برون‌یابی نشده و برون‌یابی شده به روش اسپیلان مکعبی را نشان می‌دهد.



همانند قبل ولی تنها یک مرتبه با دامنه ۷۵۰ نیوتن در وسط تیر اعمال می‌شود.

مورد دوم، اثر وجود نویز محیطی و یا خطا در سنجش داده‌ها می‌باشد که در مشاهدات تجربی می‌تواند اتفاق بیفتد. همانطور که در بخش مقدمه ذکر گردید، در مطالعات عددی می‌توان از اضافه کردن نویز سفید گاوسی به پاسخ‌های اخذ شده برای شبیه‌سازی این پدیده استفاده نمود. در شرایطی که نویز یا خطای اندازه‌گیری در مقایسه با سیگنال اصلی و همچنین آسیب وارده به سازه مقادیر زیادی داشته باشد، تمهیدات و روش‌های خاصی برای حذف نویز قبل از فرآیند آسیب‌یابی باید اعمال گردد [۱۳] و [۱۸]؛ ولی در شرایطی که میزان نویز اندک باشد، ممکن است فرآیند تبدیل موجک با انتخاب‌های مناسب بتواند محل آسیب را حتی با وجود نویز در پاسخ اندازه‌گیری شده، نشان دهد [۱۷] و [۱۹]. در اینجا با توجه به اینکه هدف مقاله و تمرکز آن بر روی کاهش اثرات لبه و نه اثرات نویز می‌باشد، تنها اثر وجود نویز کم ارزیابی می‌شود. برای این منظور، بر پاسخ تیر دو سر گیردار با دو آسیب



شکل ۱۵- نتایج حاصل برای تیر دو سر گیردار با دو محل خرابی و تحت تأثیر وجود نویز؛ (الف) پاسخ جابه‌جایی اخذ شده با و بدون نویز، (ب) و (پ) به ترتیب اندازه ضرایب موجک حاصل از پردازش پاسخ نویزدار برون‌یابی نشده و برون‌یابی شده در ۱۶ مقیاس اول

عنوان اثرات لبه یاد می‌شود. اثرات لبه در پژوهش حاضر، تأثیر آسیب بر ضرایب موجک را کم‌رنگ کرده و موجب کاهش دقت در تخمین محل آسیب می‌شود. به منظور کاهش اثرات لبه، روش‌های مختلف برون‌یابی پاسخ تیر به سمت نقاط خارج از بازه طول آن ارزیابی گردید. مشاهده شد که روش اسپیلاین مکعبی اثرات لبه را به طور قابل ملاحظه‌ای در هر دو تیر کاهش داده و با وضوح بالاتری محل آسیب از مقادیر ضرایب موجک تعیین می‌شود. همچنین در این حالت با دقت بالایی می‌توان تغییر شدت آسیب از سطح اول به دوم و از سطح دوم به سوم را با مشاهده تغییرات اندازه ضرایب موجک در طی ۶۰ سنجش متوالی انجام شده، ملاحظه کرد. بنابراین روش به‌کار گرفته شده در این تحقیق، علاوه بر تشخیص و تعیین محل آسیب در طول تیرهای فولادی، افزایش شدت آسیب را نیز تخمین زده و می‌تواند در پایش سلامت سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

در انتها، مؤثر بودن روش به‌کار گرفته شده، وقتی نویز اندک در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده از تیر وجود داشته باشد و همچنین چند خرابی با میزان آسیب متفاوت در طول تیر موجود باشد، نشان داده شد. در زمینه محدودیت‌های روش پیشنهادی نیز می‌توان گفت که در اینجا پاسخ‌های اخذ شده از تعداد زیادی نقطه در سرتاسر تیر برای پردازش نتایج استفاده شد، در حالی که در عمل، معمولاً تعداد محدودی سنسور برای اخذ پاسخ وجود خواهد داشت. بنابراین باید ابتدا با استفاده از روش‌های قابل اطمینانی، پاسخ اخذ شده از نقاط محدود به سرتاسر تیر تعمیم یابد.

محل آسیب‌ها در شکل ۱۵- ب و پ با خط‌چین سفید مشخص شده است. مشاهده می‌گردد که اثرات هم‌زمان لبه و نویز باعث می‌شود قبل از برون‌یابی نتایج، آسیب‌ها به سختی از ضرایب موجک قابل تشخیص باشند؛ ولی بعد از برون‌یابی نتایج، محل هر دو آسیب با ضرایب موجک بالا کاملاً قابل تشخیص است. این تشخیص و تمییز محل آسیب‌ها، مخصوصاً در مقیاس‌های ۶ به بالا مشهودتر است. بنابراین با وجود نویز اندک و همچنین وجود دو آسیب در طول تیر، همچنان روش به‌کار گرفته شده موفق عمل می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، تشخیص، تعیین محل و تعیین تغییرات آسیب فزاینده در تیرهای فولادی می‌باشد. برای این منظور، یک تیر فولادی در شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار و دو سرمفصل در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی گردیده و آسیب‌های افزایشی در یک نقطه از طول آن در سه سطح مختلف با ایجاد تغییر در سختی خمشی آن نقطه از تیر شبیه‌سازی شد. سپس پاسخ جابه‌جایی تیر تحت اثر بار ضربه با دامنه تصادفی در وسط دهانه آن در ۶۰ سنجش استخراج گردید.

به منظور ارزیابی پاسخ‌های جابه‌جایی به‌دست آمده برای اهداف آسیب‌یابی، از تبدیل موجک پیوسته برای پردازش آنها استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که پردازش پاسخ جابه‌جایی تیر به عنوان یک سیگنال ورودی با طول محدود در تبدیل موجک موجب تولید ضرایب موجک بسیار بزرگ در نقاط تکیه‌گاهی می‌شود که نتیجه ذاتی تبدیل موجک در نقاط مرزی است و از آن تحت

References

- [1] Steffens RJ. Some aspects of structural vibration. Proceedings of a Symposium on Vibration in Civil Engineering, London, UK. 1966.
- [2] Wauer J. On the dynamics of cracked rotors: a literature survey. Applied Mechanics Reviews. 1990 Jun 1; 43(1): 13-17. doi: 10.1115/1.3119157
- [3] Salawu OS. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. Engineering structures. 1997 Sep 1; 19(9): 718-723. doi: 10.1016/S0141-0296(96)00149-6

- [4] Sha G, Radziński M, Cao M, Ostachowicz W. A novel method for single and multiple damage detection in beams using relative natural frequency changes. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019 Oct 1; 132: 335-352. doi: **10.1016/j.ymssp.2019.06.027**
- [5] Lee NL. Application of two-stage evaluation and optimization update methods for the structural damage detection of a portal beam structure. In *Structures*. Elsevier. 2021 Feb 1; 29: 684-690. doi: **10.1016/j.istruc.2020.11.035**
- [6] Zhou Y, Sun L. Effects of environmental and operational actions on the modal frequency variations of a sea-crossing bridge: A periodicity perspective. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019 Sep 15; 131: 505-523. doi: **10.1016/j.ymssp.2019.05.063**
- [7] Douka E, Loutridis S, Trochidis A. Crack identification in beams using wavelet analysis. *International Journal of Solids and Structures*. 2003 Jun 1; 40(13-14): 3557-3569. doi: **10.1016/S0020-7683(03)00147-1**
- [8] Rucka M, Wilde K. Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates. *Journal of Sound and Vibration*. 2006 Nov 6; 297(3-5): 536-550. doi: **10.1016/j.jsv.2006.04.015**
- [9] Shahsavari V, Chouinard L, Bastien J. Wavelet-based analysis of mode shapes for statistical detection and localization of damage in beams using likelihood ratio test. *Engineering Structures*. 2017 Feb 1; 132: 494-507. doi: **10.1016/j.engstruct.2016.11.056**
- [10] Wang Q, Deng X. Damage detection with spatial wavelets. *International Journal of Solids and Structures*. 1999 Aug 1; 36(23): 3443-3468. doi: **10.1016/S0020-7683(98)00152-8**
- [11] Liew KM, Wang Q. Application of wavelet theory for crack identification in structures. *Journal of Engineering Mechanics*. 1998 Feb; 124(2): 152-157. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:2(152)**
- [12] Quek ST, Wang Q, Zhang L, Ang KK. Sensitivity analysis of crack detection in beams by wavelet technique. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001 Dec 1; 43(12): 2899-2910. doi: **10.1016/S0020-7403(01)00064-9**
- [13] Liu JL, Wang SF, Li YZ, Yu AH. Time-varying damage detection in beam structures using variational mode decomposition and continuous wavelet transform. *Construction and Building Materials*. 2024 Jan 12; 411: 134416. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2023.134416**
- [14] Khanahmadi M, Gholhaki M, Rezaifar O, Dejkam B. Damage identification in steel beam structures based on the comparison of analytical results of wavelet analysis. *Civil Infrastructure Researches*. 2023 Feb 20; 8(2): 173-183. doi: **10.22091/cer.2022.8340.1407** [In Persian]
- [15] Sadeghi F, Yu Y, Zhu X, Li J. Damage identification of steel-concrete composite beams based on modal strain energy changes through general regression neural network. *Engineering Structures*. 2021 Oct 1; 244: 112824. doi: **10.1016/j.engstruct.2021.112824**
- [16] Habibzadeh Azari O, Ghaffarzadeh H. Damage Detection Using Wavelet Packet Decomposition and Random Forests Algorithm in Experimental Structure at the UBC (University of British Columbia). *Civil Infrastructure Researches*. 2018 Feb 20; 3(2): 51-60. doi: **10.22091/cer.2017.2209.1091** [In Persian]
- [17] Abdulkareem M, Bakhary N, Vafaei M, Noor NM, Mohamed RN. Application of two-dimensional wavelet transform to detect damage in steel plate structures. *Measurement*. 2019 Nov 1; 146: 912-923. doi: **10.1016/j.measurement.2019.07.027**
- [18] Su C, Jiang M, Liang J, Tian A, Sun L, Zhang L, Zhang F, Sui Q. Damage assessments of composite under the environment with strong noise based on synchrosqueezing wavelet transform and stack autoencoder algorithm. *Measurement*. 2020 May 1; 156: 107587. doi: **10.1016/j.measurement.2020.107587**
- [19] Pnevmatikos NG, Hatzigeorgiou GD. Damage detection of framed structures subjected to earthquake excitation using discrete wavelet analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2017 Jan; 15: 227-248. doi: **10.1007/s10518-016-9962-z**
- [20] Hoggar SG. *Mathematics of digital images: creation, compression, restoration, recognition*. Cambridge University Press; 2006 Sep 14.
- [21] Gröchenig K. *Foundations of time-frequency analysis*. Springer Science & Business Media; 2013 Dec 1.
- [22] Bhatnagar N. *Introduction to wavelet transforms*. Chapman and Hall/CRC; 2020 Feb 18.
- [23] Shi B, Cao M, Wang Z, Ostachowicz W. A directional continuous wavelet transform of mode shape for line-type damage detection in plate-type structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022 Mar 15; 167: 108510. doi: **10.1016/j.ymssp.2021.108510**
- [24] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1992 Jan 1; 24(1): 395-458. doi: **10.1146/annurev.fl.24.010192.002143**
- [25] Wu N, Wang Q. Experimental studies on damage detection of beam structures with wavelet transform. *International Journal of Engineering Science*. 2011 Mar 1; 49(3): 253-261. doi: **10.1016/j.ijengsci.2010.12.004**
- [26] Misiti M, Misiti Y, Oppenheim G, Poggi JM. *Wavelet toolbox*. The MathWorks Inc., Natick, MA. 1996 Mar; 15: 21.

- [27] Messina A. Refinements of damage detection methods based on wavelet analysis of dynamical shapes. *International Journal of Solids and Structures*. 2008 Jul 1; 45(14-15): 4068-4097. **doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.02.015**
- [28] Montanari L, Basu B, Spagnoli A, Broderick BM. A padding method to reduce edge effects for enhanced damage identification using wavelet analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015 Feb 1; 52: 264-277. **doi: 10.1016/j.ymsp.2014.06.014**